第 37 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.37,No.5
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510102049

全为民,冯美,周振兴,吴祖立,唐峰华,王云龙,包小松,沈辉,成伟.江苏海门蛎岈山牡蛎礁恢复工程的生态评估.生态学报,2017,37(5):1709-1718.
Quan W M, Feng M, Zhou Z X, Wu Z L, Tang F H, Wang Y L, Bao X S, Shen H, Cheng W.Ecological assessment of the oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic communities on restored oyster reefs along Jiangsu Province coast, China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1709-1718.

江苏海门蛎岈山牡蛎礁恢复工程的生态评估

全为民[1,*],冯 美[2],周振兴[2],吴祖立[1],唐峰华[1],王云龙[1],包小松[2],沈 辉[2],成 伟[2]

1 农业部东海及远洋渔业资源开发利用重点实验室,中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090
2 江苏海门蛎岈山国家级海洋公园管理处, 海门 226156

摘要:江苏海门蛎岈山牡蛎礁是我国目前现存的面积最大的潮间带活体牡蛎礁,但由于人类活动干扰及泥沙淤积等原因,该自然牡蛎礁面积不断缩小,影响着该牡蛎礁的生态功能与保护管理。于 2013—2014 年开展了首期江苏海门蛎岈山牡蛎礁恢复工程,基于生态监测结果评估该牡蛎礁恢复工程的生态效果。多层礁体上活体牡蛎丰度显著高于单层礁体(P<0.05);随着礁体的发育,恢复礁体上牡蛎丰度显著下降 (P<0.05)。非参数 Kruskal-Wallis 检验结果显示,在两个生活周期内(2013-09—2013-11,2014-03—2014-05)牡蛎均呈现快递的生长(Q=10.519,Q=6.527,P<0.05),而在越冬期内(2013-11—2014-03)牡蛎几乎停止了生长(Q=0.35,P>0.05)。随着礁体的发育,恢复牡蛎礁上大型底栖动物群落的物种丰度并没有增加,但其平均总密度和总生物量均呈现显著性的增长(P<0.05);礁体构建后 1a 时恢复牡蛎礁中大型底栖动物的平均总密度和生物量均接近于自然牡蛎礁(P>0.05),但显著高于未恢复区(P<0.05);恢复牡蛎礁与自然牡蛎礁具有显著不同的大型底栖动物群落(ANOSIM, P=0.001)。研究结果表明该牡蛎礁恢复工程取得初步成功。

关键词:生境;生物礁;生态系统工程;底栖动物;群落;熊本牡蛎

Ecological assessment of the oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic communities on restored oyster reefs along Jiangsu Province coast, China

QUAN Weimin[1,*], FENG Mei[2], ZHOU Zhenxing[2], WU Zuli[1], TANG Fenghua[1], WANG Yunlong[1], BAO Xiaosong[2], SHEN Hui[2], CHENG Wei[2]

1 *Key Laboratory of East China Sea and Marine Fishery Resource Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai* 200090, *China*
2 *Administration Agency of National Marine Garden of Haimen Liyashan, Haimen* 226156, *China*

Abstract: Oyster reefs are an important coastal habitat providing essential ecosystem services, including water filtration, habitat provisioning, shoreline stabilization, and nutrient retention. The Liyashan oyster reef is located inshore of Dongzhao Port, Haimen County, Jiangsu Province, China. However, the natural intertidal oyster reef is rapidly degrading due to high sedimentation, habitat loss, and overfishing, with its area reduced by 30% during 2003—2013. To protect the important biogenic reef, a restoration project was initiated in 2013—2014. We recycled 100 tons of oyster shells (≥ 6 months) from the oyster aquaculture zone in Xiangshan Bay as substrate (cultch) for oyster larval setting, where 16000 nylon bags (diameter: 20 cm, height: 50 cm, mesh: 2 cm) were filled with old oyster shells. In early July 2013, the oyster shells

基金项目:江苏海门蛎岈山国家级海洋公园管理处项目;中央级公益性科研院所(东海水产研究所)基本科研业务费项目(2014G01,2015M01);国家自然科学基金面上项目(31170508)

收稿日期:2015-10-10; **网络出版日期**:2016-07-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: quanweim@163.com

were placed in the Liyashan waters, creating a habitat for young oysters to attach and grow to ensure their abundance. We constructed 53 small reefs (24 single-layer reefs [SLR] and 29 multi-layer reefs [MLR]) at five restoration sites within the Liyashan area. Oyster abundance was significantly higher in MLR than in SLR at each of the four sampling periods, but showed a significant decline with reef development. The mean shell height of oysters in the restored reef significantly increased during two periods (from September to November 2013, and March to May 2014) (Kruskal-Wallis test, $Q=10.519$, $Q=6.527$, $P<0.05$), but oysters stopped growing in the overwintering period (Nov 2013 to March 2014) ($Q=0.35$, $P>0.05$). Forty-one species of resident benthic macrofauna were recorded at the restored reefs. Although there were few changes in species richness, the mean density and biomass showed significant increases with reef development that were similar to the adjacent natural oyster reef, but significantly higher than at the non-restored zone. The mean total density and biomass of benthic communities were 5.1 and 3.1 times higher, respectively, at restored than at non-restored reefs. MDS plots showed that resident benthic communities differed significantly between the restored and adjacent natural reefs (ANOSIM, $P=0.001$), which were mainly attributed to higher densities of sipunculid worms (*Phascolosoma esculenta*), rock snails (*Thais luteostoma*), polychaete worms (*Perinereis nuntia*), and Asian shore crabs (*Hemigrapsus sinensis*). Oyster reef restoration in Jiangsu Province was considered to be successful, improving the oyster population, reef area and density, and biomass of resident macrofauna.

Key Words: habitat; biogenic reef; ecosystem engineer; macrobenthos; community; *Crassostrea sikamea*

牡蛎礁(oyster reef)是一种广泛分布于温带河口和滨海区的特殊海洋生境,具有净化水体、提供鱼类生境、能量耦合、防止岸线侵蚀和固汇等重要生态功能[1-5]。近100多年来,过度捕捞、环境污染和病害浸染等使全球牡蛎礁分布面积约下降85%,从而改变了近岸水域生态系统的结构与功能,加剧水体富营养化及有毒有害赤潮的发生,严重威胁着河口和滨海区重要经济鱼类的种群维持和资源补充[6-7]。为重振牡蛎产业、恢复牡蛎礁生境及其提供的生态服务价值,自从20世纪50年代美国联邦政府和许多州(如马里兰、弗吉尼亚、北卡、南卡和佛罗里达等)在大西洋及墨西哥湾沿岸陆续开展了一系列的牡蛎礁恢复项目[1,6,8]。实践证明,人工恢复的牡蛎礁在改善水质、修复生态系统、提供鱼类生境和维持生物多样性等方面发挥了重要的生态功能[9-11]。

江苏海门蛎岈山牡蛎礁是我国目前面积最大的潮间带活体牡蛎礁。相关研究结果表明,该牡蛎礁既维持着较高的生物多样性、也为众多水产生物提供了栖息生境[12-14]。但由于人为捕捞及泥沙沉积等原因,江苏海门蛎岈山牡蛎礁内牡蛎个体逐渐小型化、礁体面积不断缩小,这影响着该牡蛎礁的生态功能与保护管理。为此,江苏海门蛎蚜山国家级海洋公园管理处联合中国水产科学研究院东海水产研究所组成专业团队,启动"江苏海门蛎岈山国家级海洋公园牡蛎礁生态建设工程(一期)"项目,目标是增殖牡蛎种群、扩增活体牡蛎礁面积。

在广义上,牡蛎礁恢复的目标是保持生物多样性、增加渔业资源和经济贝类的产量及提供生态服务价值。然而,在具体实践中很难设定牡蛎礁恢复的特殊目标和评价标准[1,8]。牡蛎礁恢复效果的生态评价指标通常包括牡蛎的密度、个体大小和定居性动物群落等[5,9]。尽管美国开展了大量的牡蛎礁恢复工程,然而大多数项目并未对牡蛎礁恢复后的效果开展跟踪监测与评估[10-11]。本项目首次于国内开展潮间带牡蛎礁恢复工程,结合后期的跟踪监测结果评估了该牡蛎礁恢复工程的生态效果。

1 材料与方法

1.1 研究地点

江苏海门牡蛎礁(32°08′22.6″—2°09′22.5″N, 121°32′33.2″—121°33′22.8″E)位于江苏省海门市南黄海沿岸的小庙洪水域。礁体露出时间在大潮汛时为每潮次4—6 h, 中潮汛时为2—4 h, 小潮汛时礁体1—2 d不露出。礁区总面积为3.5 km^2, 其中密集区约1.5 km^2[13]。该自然牡蛎礁由750大小不同的潮间带斑块组成,

牡蛎礁总面积约 20 hm^2。礁区内分布于 3 种活体牡蛎物种,其中熊本牡蛎(*Crassostrea sikamea*)为目前主要的造礁物种[13]。

1.2 生态恢复工程

建造礁体的底物材料为熊本牡蛎的贝壳,取自浙江省象山港牡蛎养殖区,收集的牡蛎壳(≥6 个月的老壳)用高压水枪冲洗干净、太阳光直晒消毒后装于网袋;网袋规格为直径 25 cm、网目 2.5 cm,长 50 cm 的圆柱形,每袋装 24 L 牡蛎壳,本工程共制作 1.6 万个牡蛎壳礁袋(Shell-in-bag)。恢复牡蛎礁的构建方法参照文献[1,8],采用两种礁体类型(图 2):(1)单层礁体(SLR):依据水流流向,将礁袋依肩并肩方式依次排布,礁袋之间不留空隙,其中礁体长轴方向与水流流向平行;(2)多层礁体(MLR):按"肩并肩"方式构建底层后,在其上面再排布 1—2 层,形成多层礁体。本牡蛎礁恢复工程于 2013 年 7 月 6—10 日期间开展,在海门蛎岈山内设置了 5 个潮间带恢复地点(AOR1—AOR5),于大汛期滩面露干后上滩排布礁袋,共构建 SLR 礁体 24 个,MLR 礁体 26 个,总面积达 2335 m^2。

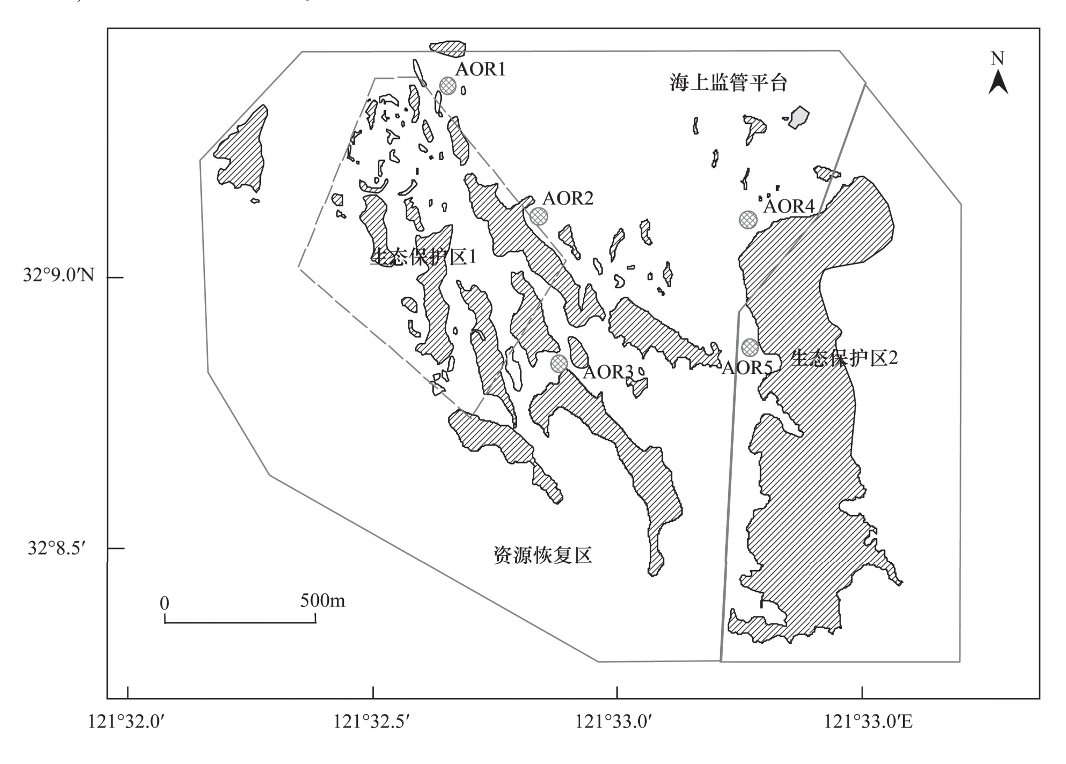


图 1　江苏海门蛎岈山牡蛎礁恢复地点

Fig.1　Restoration site for Liyashan oyster reef, Haimen County, Jiangsu Province

1.3 生态监测与评估

2013 年 9 月、11 月及 2014 年 3 月和 5 月对恢复牡蛎礁上牡蛎数量、个体大小及礁体底栖动物群落进行了生态监测。在每次采样时,在每个牡蛎礁恢复地点随机选择 3 个 SLR 和 3 个 MLR 礁体,于每个礁体上随机挑取 1 个表层牡蛎壳礁袋,立即装入网袋(网目 0.5 mm)内,带回岸上处理。在岸上,剪断网袋后将礁袋里的所有材料倒入不锈钢网筛(网目 0.5 mm)里,用自来水冲洗干净后,对每个牡蛎壳上活体牡蛎进行计数,并随机选取 20 个活体牡蛎,用游标卡尺测量壳高(SH,mm)。同步挑取网筛内所有的定居性大型底栖动物,装于样品瓶内,用 75%乙醇固定保存后带回室内分析。在室内,将每个动物样品鉴定至物种水平。在最后一次生态监测时(2014 年 5 月),同步对自然牡蛎礁和未恢复区(对照区)中大型底栖动物进行了调查采样;在每个恢复地点,在自然牡蛎礁区和未恢复地点(对照区)分别布设 9 个 0.3 m×0.3 m 样方,每种生境类型共计 45 个样方。具体采样方法参照文献[13]。



图 2 单层礁体(SLR)和多层礁体(MLR)

Fig.2 Color photo of single-layer reef (SLR) and multi-layer reef (MLR)

1.4 数据统计

数据经对数 lg(x+1)转换后输入统计软件 Statistic 6.0 分析。运用二维方差分析(2-way ANOVA)检验时间和礁体类型(MLR vs SLR)对牡蛎丰度的影响。采用非参数 Kruskal-Wallis 检验分析牡蛎 SH 的季节性变化。运用一维方差分析检验恢复礁体上定居性大型底栖动物总密度和总生物量的季节变化、并比较 3 种不同类型生境(自然牡蛎礁、恢复牡蛎礁和对照区(未恢复区))间定居性大型底栖动物总密度和总生物量。多重比较采用新复极差法,并采用字母法标记。

运用多变量统计分析(PRIMER 软件包,版本 5.0)比较恢复牡蛎礁与自然牡蛎礁间定居性大型底栖动物群落结构。首先计算生境类型间的排名相似度矩阵,据此产生非度量多维标度排序(MDS),并运用相似性分析(ANOSIM)检验恢复牡蛎礁与自然礁体间底栖动物群落的显著性差异。相似度分析(SIMPER)用来检验不同时间点恢复牡蛎礁之间及其与自然牡蛎礁之间底栖动物群落的非相似性,并识别对非相似性贡献大的物种。

2 结果

二维方差分析结果表明,时间和礁体类型均显著影响恢复牡蛎礁上牡蛎丰度(时间:$F_3=4.371, P=0.006$;礁体类型:$F_1=21.665, P<0.001$),两者之间没有显著的互作效应($F_{3,110}=1.847, P=0.143$)。LSD 多重比较(图 3)显示:MLR > SLR ($P<0.05$);从 2013 年 9 月至 2014 年 3 月,SLR 和 MLR 牡蛎丰度没有显著性的时间变化($P>0.05$),但 2014 年 5 月时牡蛎丰度显著低于 2013 年 9 月和 11 月($P<0.05$)。

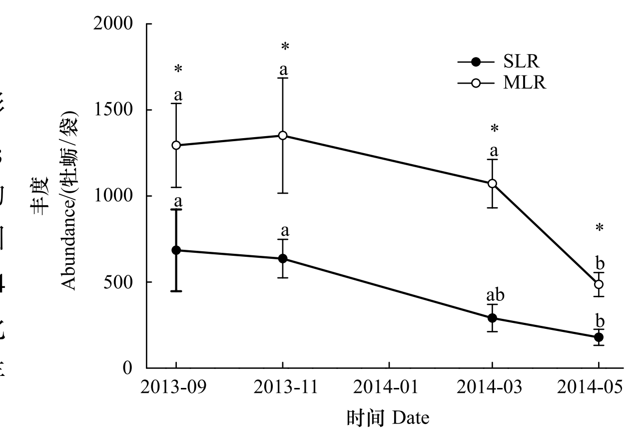


图 3 恢复牡蛎礁中牡蛎丰度的时间变化

Fig. 3 Temporal variations in oyster abundances at restored oyster reefs; SLR-single-layer reef, MLR-multi-layer reef

SLR:单层礁体 single-layer reef, MLR:多层礁体 multi-layer reef. 误差棒表示±1SE,不同小写字母表示牡蛎丰度具有显著的时间变化($P<0.05$). * 表示在 SLR 和 MLR 间具有显著性差异($P<0.05$)

非参数 Kruskal-Wallis 检验结果显示,在两个生长周期内(2013-09—2013-11, 2014-03—2014-05)牡蛎平均 SH 分别增加了 3.5 mm 和 5.1 mm,表现出显著性增长(图 4, $Q=10.519, Q=6.527, P<0.05$);而在越冬期内(2013-11—2014-03),牡蛎平均 SH 仅增加了 0.2 mm,没有显著性增长(图 4, $Q=0.35, P>0.05$)。

在恢复牡蛎礁上共记录到大型底栖动物 8 个门类 41 种(表 1),其中甲壳动物 15 种(蟹 9 种),软体动物 11 种(腹足类 7 种、双壳类 4 种),环节动物 8 种,棘皮

动物和鱼类各 2 种,星形动物、腔肠动物和脊索动物各 1 种。2013 年 9 月记录到 30 种大型底栖动物,2013 年 11 月 26 种、2014 年 3 月 29 种和 2014 年 5 月 26 种。随着礁体的发育,大型底栖动物群落的物种丰度并没有增加。

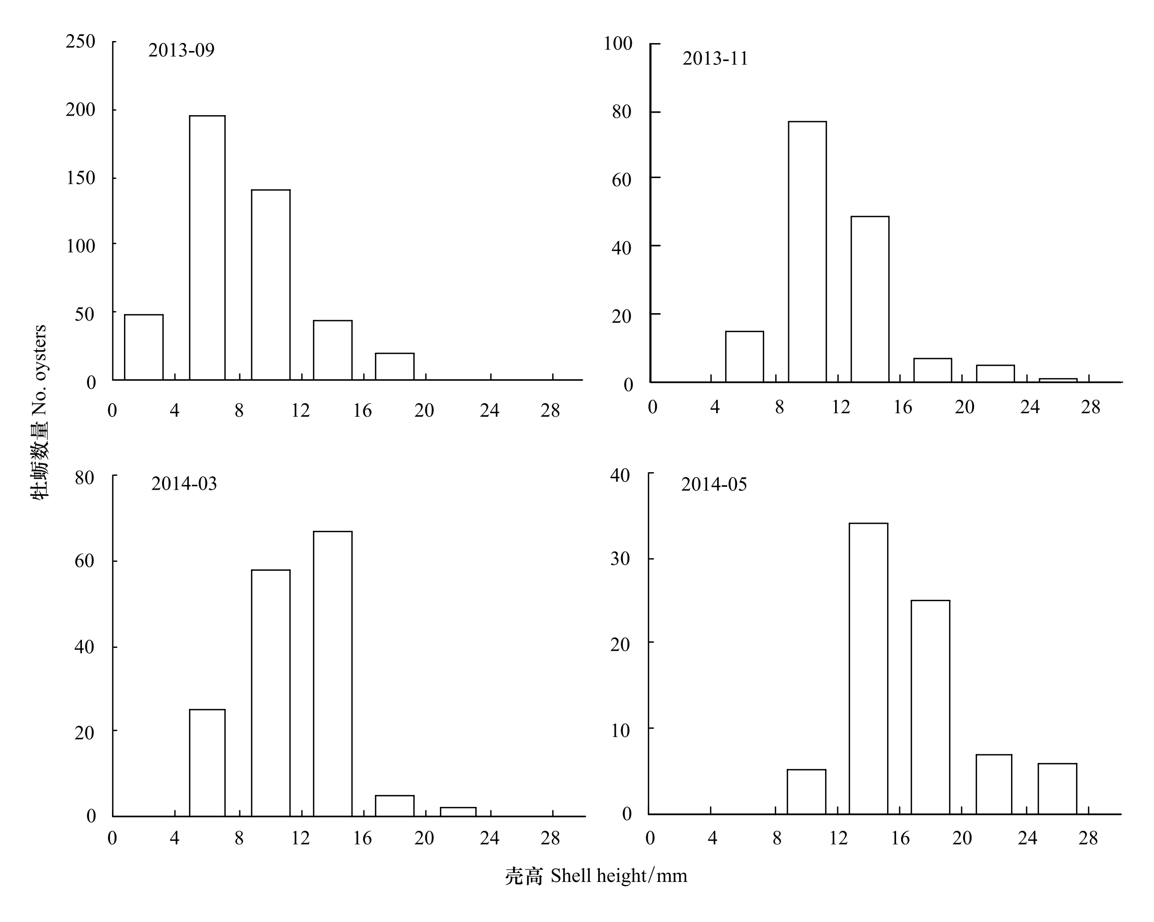


图 4　恢复牡蛎礁中牡蛎的大小频率分布

Fig.4　Size-frequency distribution of oyster population in restored oyster reef

表 1　恢复牡蛎礁中大型底栖动物的物种名录

Table 1　Species list of resident benthic macrofauna at the created oyster reefs

类别 Taxa	物种 Species	2013-09	2013-11	2014-03	2014-05
甲壳动物	日本蟳 *Charybdis japonica*	√			√
Crustacean	长指近方蟹 *Hemigrapsus longitarsis*	√	√		
	绒螯近方蟹 *Hemigrapsus peniciillatus*			√	√
	中华近方蟹 *Hemigrapsus sinensis*	√		√	√
	特异大权蟹 *Macromedaeus distinguendus*	√	√	√	√
	四齿大额蟹 *Metopograpsus quadridentatus*	√	√	√	√
	锯额豆瓷蟹 *Pisidia serratifrons*	√	√	√	√
	光辉圆扇蟹 *Sphaerozius nitidus*	√		√	√
	兰氏三强蟹 *Tritodynamia rathbunae*			√	
	日本鼓虾 *Alpheus japonicus*	√	√	√	√
	雷伊著名团水虱 *Gnorimosphaeroma rayi*			√	
	鞭腕虾 *Lysmata vittata*	√			
	巨指长臂虾 *Palaemon macrodacty*			√	
	板跳钩虾 *Platorchestia* sp.			√	
	白脊藤壶 *Balanus albicostatus*	√	√	√	√

续表

类别 Taxa	物种 Species	2013-09	2013-11	2014-03	2014-05
软体动物 Mollusca	甲虫螺 *Cantharidus* sp.	√	√		√
	中国笔螺 *Mitra chinensis*		√		√
	丽核螺 *Mitrella bella*	√	√	√	√
	西格织纹螺 *Nassarius siquinjorensis*			√	
	齿纹蜒螺 *Nerita yoldi*	√	√	√	√
	脉红螺 *Rapana venosa*	√	√	√	√
	黄口荔枝螺 *Thais luteostoma*	√	√	√	√
	菲律宾蛤仔 *Ruditapes philippinarum*	√	√		
	双纹须蚶 *Barbatia bistrigata*	√	√	√	√
	黑荞麦蛤 *Ruditapes philippinarum*		√	√	√
	渤海鸭嘴蛤 *Laternula marilina*			√	√
环节动物 Annelida	丝鳃虫 *Cirratulus* sp.	√			√
	智利巢沙蚕 *Diopatra chiliensis*	√	√	√	√
	长吻沙蚕 *Glycera chirori*	√	√	√	
	日本角吻沙蚕 *Goniada japonica*			√	
	覆瓦哈鳞虫 *Harmothoe imbricata*	√	√	√	
	索沙蚕 *Lumbrineris* sp.	√	√		
	岩虫 *Marphysa sanguinea*	√	√	√	√
	多齿围沙蚕 *Perinereis nuntia*	√	√	√	√
棘皮动物 Echinodermata	滩栖阳遂足 *Amphiura vadicola*	√	√	√	
	钮细锚参 *Leptosynapta ooplax*			√	
星形动物 Sipuncula	可口革囊星虫 *Phascoknma esulenta*	√	√	√	√
腔肠动物 Coelenterata	星虫状海氏海葵 *Edwardsia sipunculoides*	√	√		√
脊索动物 Chordata	海鞘 Ascidiacea	√	√		√
鱼类	美肩鳃鳚 *Omobranchus elegans*	√	√		
	髭缟鰕虎 *Tridentiger barbatus*	√			√

√代表此处有该物种

随礁体发育,恢复牡蛎礁上定居性大型底栖动物的平均总密度和平均总生物量总体上呈现出增长的趋势(图 5)。从 2013 年 9 月至 2013 年 11 月,平均总密度和平均总生物量没有显著性变化(P>0.05);但随后大型底栖动物的平均总密度和平均总生物量呈现快递的增长(P<0.05)。

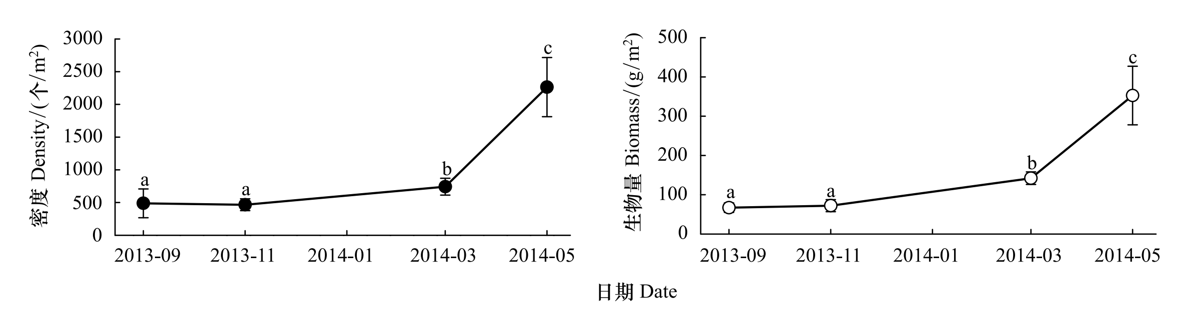


图 5　恢复牡蛎礁中大型底栖动物平均总密度和平均总生物量的变化

Fig.5　Change in the mean total density and biomass of resident benthic communities at restored oyster reefs with reef development

误差棒表示±1SE, 不同小写字母表示显著的时间变化(P< 0.05)

一维方差分析结果表明(图 6),经过 1 a 左右的发育,至 2014 年 5 月时恢复牡蛎礁中大型底栖动物的平

均总密度和生物量接近于自然牡蛎礁(图 6,$P>0.05$),但均显著高于未恢复区(图 6,$P<0.05$);其中。恢复牡蛎礁中大型底栖动物的平均总密度是未恢复区的 6.1 倍,平均总生物量比未恢复区高出 3.1 倍。

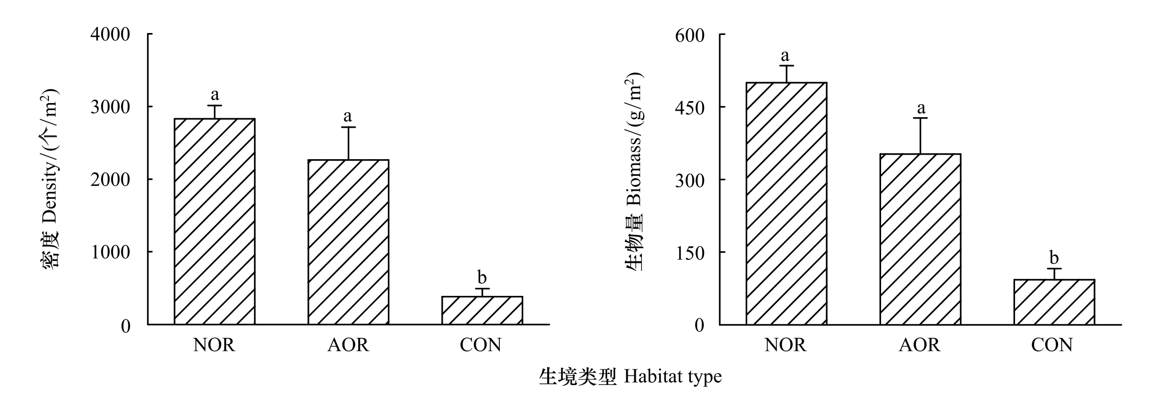


图 6　2014 年 5 月不同类型生境中大型底栖动物平均总密度和生物量的比较

Fig.6 Comparison of the mean total density and biomass of resident benthic communities among different habitats in May of 2015

NOR:自然牡蛎礁,AOR:恢复牡蛎礁,CON:对照区(未恢复区). 误差棒表示±1SE, 不同小写字母表示在生境类型间具有显著性差异($P<0.05$)

MDS 排序结果显示,恢复牡蛎礁与自然牡蛎礁具有显著不同的定居性大型底栖动物群落(ANOSIM,$P=0.001$)(图 7);造成群落差异的主要原因为(表 2):自然牡蛎礁具有更高密度的可口革囊星虫 *Phascoknma esulenta*, 黄口荔枝螺 *Thais luteostoma*, 多齿围沙蚕 *Perinereis nuntia* 和中华近方蟹 *Hemigrapsus sinensis* (表 2)。从 2013 年 9 月至 2014 年 5 月期间,恢复牡蛎礁中定居性大型底栖动物群落表现出显著的时间变化(ANOSIM,$P<0.05$),造成群落差异的主要物种包括特异大权蟹 *Macromedaeus distinguendus*、绒螯近方蟹 *Hemigrapsus peniciillatus*, 四齿大额蟹 *Metopograpsus quadridentatus*、智利巢沙蚕 *Diopatra chiliensis* 和丽核螺 *Mitrella bella*。

3　讨论

3.1　牡蛎种群和底栖动物群落发育

牡蛎礁恢复最重要的目标是建立一个自维持的牡蛎种群及其提供的生态服务功能[11]。牡蛎种群的形成和维持依赖于适合的生存环境(如温度、盐度、溶解氧)[16]。在礁体构建后 2 个月时(2013 年 9 月),本研究中单、多层礁体中牡蛎密度分别达到(5474.7±1898.4)个/m² 和(10350.9±1948.8)个/m²,表明在夏季期间有很高的牡蛎幼体补充量,这主要归功于江苏海门蛎岈山牡蛎礁中较高的熊本牡蛎种群数量;在礁体构建后约 1a 时(2014 年 5 月),单、多层礁体中牡蛎平均密度(SLR:(1430.7±374.2)个/m², MLR:(3884.0±558.6)个/m²),与邻近的自然牡蛎礁(609—3119 个/m²)[13]相似,但明显高于美国路易斯安那州 Sister 湖((728.1±101.9)个/m²)[17]、Chesapeake 湾(180—920 个/m²)[18]和中国长江口(850 个/m²)[5]的恢复牡蛎礁,表明该恢复地点的生态环境非常适合于牡蛎的生长、繁殖以及礁体发育。

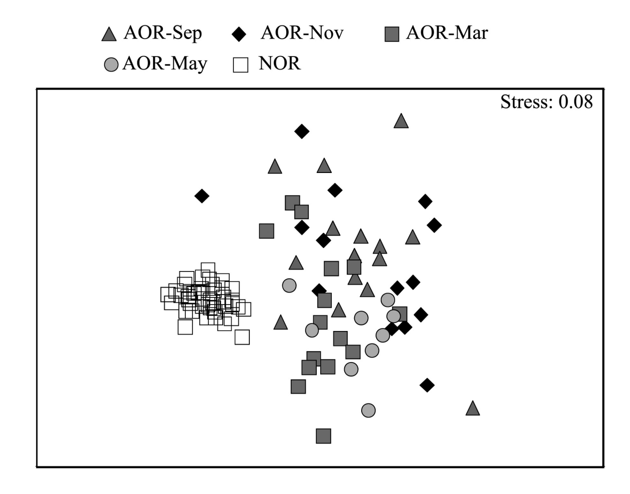


图 7　恢复牡蛎礁(AOR)与自然牡蛎礁(NOR)中大型底栖动物群落的非度量多维标度排序

Fig. 7　Non-multidimenasional scaling (NMDS) of benthic macroinvertebrate communities in the artificial oyster reef (AOR) and natural oyster reef (NOR)

AOR-Sep:2013 年 9 月恢复牡蛎礁,AOR-Nov:2013 年 11 月恢复牡蛎礁,AOR-Mar:2014 年 3 月恢复牡蛎礁, AOR-May:2014 年 5 月恢复牡蛎礁

泥沙沉积是影响牡蛎礁恢复效果的重要环境因子之一。许多研究结果表明,具有垂直结构的礁体(如石灰岩、混凝土模块等)更有利于牡蛎幼体的附着、生长以及礁体发育。如 Schulte 等[19]发现高结构礁体(High-relief reef)中牡蛎平均密度比低结构礁体(Low-relief reef)高出 4 倍。本研究中多层礁体中活体牡蛎密度显著高于单层礁体,主要原因是牡蛎壳礁袋投放后,由于自身重量会导致其下沉 10—15 cm,致使单层礁体仅高于地表约 10 cm,这种低结构的单层礁体易于被泥沙覆盖;而多层礁体具有约 30—40 cm 的垂直结构,可以为牡蛎提供更多的附着及生长空间。

表 2 恢复牡蛎礁(AOR)和自然牡蛎礁(NOR)中定居中性大型底栖动物群落的相似性分析结果

Table 2 Results of SIMPER and one-way ANOSIM on resident benthic communities between restored (AOR) and natural oyster reefs (NOR)

组别 Group	相似性百分比分析 SIMPER analysis		一维相似度分析 One-way ANOSIM	
	非相似度/% Dissimilarity	贡献群落差异的物种 The first 3 species contributed to dissimilarity	*R*	*P*
AOR-Sep vs AOR-Nov	55.05	特异大权蟹 *M. distinguendus*, 锯额豆瓷蟹 *Pisidia serratifrons*, 智利巢沙蚕 *Diopatra chiliensis*	0.178	0.003
AOR-Sep vs AOR-Mar	53.13	绒螯近方蟹 *Hemigrapsus peniciillatus*, 四齿大额蟹 *Metopograpsus quadridentatus*, 智利巢沙蚕 *D. chiliensis*	0.247	0.001
AOR-Sep vs AOR-May	56.97	绒螯近方蟹 *H. peniciillatus*, 四齿大额蟹 *M. quadridentatus*, 锯额豆瓷蟹 *P. serratifrons*	0.331	0.001
AOR-Nov vs AOR-Mar	54.38	丽核螺 *Mitrella bella*, 智利巢沙蚕 *D. chiliensis*, 日本鼓虾	0.340	0.001
AOR-Nov vs AOR-May	51.47	长指近方蟹 *H. longitarsis*, 特异大权蟹 *M. distinguendus*, 四齿大额蟹 *Metopograpsus quadridentatus*	0.214	0.024
AOR-Mar vs AOR-May	49.73	丽核螺 *Mitrella bella*, 绒螯近方蟹 *H. peniciillatus*, 四齿大额蟹 *Metopograpsus quadridentatus*	0.349	0.001
AOR-Sep vs NOR	64.06	可口革囊星虫 *Phascoknma esulenta*, 智利巢沙蚕 *D. chiliensis*, 多齿围沙蚕 *Perinereis nuntia*	0.951	0.001
AOR-Nov vs NOR	66.66	可口革囊星虫 *P. esulenta*, 中华近方蟹 *Hemigrapsus sinensis*, 多齿围沙蚕 *P. nuntia*	0.959	0.001
AOR-Mar vs NOR	57.86	可口革囊星虫 *P. esulenta*, 黄口荔枝螺 *Thais luteostoma*, 多齿围沙蚕 *P. nuntia*	0.958	0.001
AOR-May vs NOR	62.41	可口革囊星虫 *P. esulenta*, 多齿围沙蚕 *P. nuntia*, 黄口荔枝螺 *T. luteostoma*	0.996	0.001

列 1 中各简写代码的解释参照图 7

复杂生境的三维空间结构会增加海洋生态系统的物种丰度和多样性,原因在于这种生境可提供更多的避难和摄食场所、也会提高被捕食者的成活率,因此生物礁体中通常分布有较高密度和多样性的底栖动物和游泳动物群落[20-22]。本研究发现,在礁体构建后 1 a 时,恢复牡蛎礁中定居性大型底栖动物群落的平均总密度接近于自然牡蛎礁,但显著高于未恢复区。表明构建(或恢复)的礁体增加了生境复杂性,有利于定居性动物的补充及定居。

同时,本研究也发现恢复牡蛎礁支持着与自然牡蛎礁显著不同的底栖动物群落,这与许多研究的结果是不同的。如 Brown 等[23]比较了墨西哥湾北岸不同类型礁体(恢复礁体、自然礁体、石头礁体(含混凝土)和牡蛎壳礁体)中底栖动物和游泳动物的丰度、多样性和群落结构,发现恢复礁体与自然礁体支持着相似的动物群落。Dillon 等[24]评价了美国墨西哥湾北岸密西西比湾恢复牡蛎礁和自然牡蛎礁的功能等同性,发现两种生境具有相似的动物群落和食物网结构。本研究的周期仅为 1 a,该恢复牡蛎礁还处于快速的演替阶段,可能需要 3—5 a 才能发育成为与自然牡蛎礁相似的底栖动物群落。

3.2 牡蛎礁恢复成功评估

目前国际上对于牡蛎礁恢复成功的评价指标和评价标准仍有较大的争议,常用的评价指标包括牡蛎密度、个体大小、礁体面积、礁体高度和礁体动物等[1,16,25-26]。Powers 等[25]通过对美国北卡罗莱那州 94 个牡蛎礁(88 个构建的,6 个自然的)的监测评估,提出如下牡蛎礁恢复成功的评价标准:礁体高度>20 cm、活体牡蛎

密度>10 个/m^2,2a 调查期内至少 1a 内有幼体补充。Harwell 等[26]对 Chesapeake 湾 4 个恢复牡蛎礁设定的评价标准为:活体牡蛎密度≥400 个/m^2。La Peyre 等[27]在评价墨西哥湾北岸的恢复牡蛎礁时采用的标准为:如果礁体上有活体牡蛎存在,就定义为完全成功;如果有硬底物存在,就定义为部分成功。本研究中恢复牡蛎礁的监测结果完全满足上述标准,因此可以认为该牡蛎礁恢复工程取得了初步成功。

本研究中恢复牡蛎礁支持着高密度的牡蛎种群和丰富的定居性底栖动物群落,表明该恢复牡蛎礁可同步发挥净化水体、提供生境等生态功能。然而,与邻近自然牡蛎礁相比,该恢复牡蛎礁的定居性大型底栖动物群落与自然礁体显著不同,这种差异是否影响牡蛎礁的生态功能仍有待进一步论证。未来,需要对恢复牡蛎礁开展持续的跟踪监测与评估,从而阐明牡蛎种群和礁体动物群落的发育及演替过程,评估恢复牡蛎礁与自然牡蛎礁的功能等同性。

致谢:胡亚军、朱金江、沙强兵和冯华等帮助采样,美国罗德岛大学 Austin Humphries 助理教授帮助写作,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Coen L D, Luckenbach M W. Developing success criteria and goals for evaluating oyster reef restoration: ecological function or resource exploitation?. Ecological Engineering, 2000, 15(3): 323-343.

[2] Cressman K A, Posey M H, Mallin M A, Leonard L A, Alphin T D. Effects of oyster reefs on water quality in a tidal creek estuary. Journal of Shellfish Research, 2003, 22(3): 753-762.

[3] 全为民, 张锦平, 平仙隐, 施利燕, 李培军, 陈亚瞿. 巨牡蛎对长江口环境的净化功能及其生态服务价值. 应用生态学报, 2007, 18(4): 871-876.

[4] 全为民, 沈新强, 罗民波, 陈亚瞿. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1234-1239.

[5] Quan W M, Zhu J X, Ni Y, Shi L Y, Chen Y Q. Faunal utilization of constructed intertidal oyster (*Crassostrea rivularis*) reef in the Yangtze River estuary, China. Ecological Engineering, 2009, 35(10): 1466-475.

[6] Beck M W, Brumbaugh R D, Airoldi L, Carranza A, Coen L D, Crawford C, Defeo O, Edgar G J, Hancock B, Kay M C, Lenihan H S, Luckenbach M W, Toropova C L, Zhang G F, Guo X M. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. BioScience, 2011, 61(2): 107-116.

[7] Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H, Bjorndal K A, Botsford L W, Bourque B J, Bradbury R H, Cooke R, Erlandson J, Estes J A, Hughes T P, Kidwell S, Lange C B, Lenihan H S, Pandolfi J M, Peterson C H, Steneck R S, Tegner M J, Warner R R. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. Science, 2001, 293(5530): 629-637.

[8] Brumbaugh R D, Coen L D. Contemporary approaches for small-scale oyster reef restoration to address substrate versus recruitment limitation: a review and comments relevant for the Olympia oyster, *Ostrea lurida* (Carpenter, 1864). Journal of Shellfish Research, 2009, 28(1): 147-161.

[9] Quan W M, Humphries A T, Shen X Q, Chen Y Q. Oyster and associated benthic macrofaunal development on a created intertidal oyster (*Crassostrea ariakensis*) reef in the Yangtze River Estuary, China. Journal of Shellfish Research, 2012, 31(3): 599-610.

[10] Rodney W S, Paynter K T. Comparisons of macrofaunal assemblages on restored and non-restored oyster reefs in mesohaline regions of Chesapeake Bay in Maryland. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 335(1): 39-51.

[11] Volety A K, Savarese M, Tolley S G, Arnold W S, Sime P, Goodman P, Chamberlain R H, Doering P H. Eastern oysters (*Crassostrea virginica*) as an indicator for restoration of Everglades Ecosystems. Ecological Indicator, 2009, 9(6): S120-S136.

[12] 张忍顺. 江苏小庙洪牡蛎礁的地貌-沉积特征. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 1-7.

[13] 全为民, 安传光, 马春艳, 黄厚见, 成伟, 王云龙, 沈新强, 陈亚瞿. 江苏小庙洪牡蛎礁大型底栖动物多样性及群落结构. 海洋与湖沼, 2012, 43(5): 992-1000.

[14] 邵炳绪, 唐子英, 孙帼英, 邱郁春, 邵贻钧, 薛镇宇. 松江鲈鱼繁殖习性的调查研究. 水产学报, 1980, 4(1): 81-86.

[15] Hadley N H, Hodges M, Wilber D H, Coen L D. Evaluating intertidal oyster reef development in South Carolina using associated faunal indicators. Restoration Ecology, 2010, 18(5): 691-701.

[16] Baggett L P, Powers S P, Brumbaugh R, Coen L D, DeAngelis B, Greene J, Hancock B, Morlock S. Oyster Habitat Restoration Monitoring and Assessment Handbook. Arlington, VA, USA: The Nature Conservancy, 2014: 96.

[17] La Peyre M K, Humphries A T, Casas S M, La Peyre J F. Temporal variation in development of ecosystem services from oyster reef restoration.

Ecological Engineering, 2014, 63(1): 34-44.

[18] Nestlerode J A, Luckenbach M W, O′Beirn F X. Settlement and survival of the oyster *Crassostrea virginica* on created oyster reef habitats in Chesapeake Bay. Restoration Ecology, 2007, 15(2): 273-283.

[19] Schulte D M, Burke R P, Lipcius R N. Unprecedented restoration of a native oyster metapopulation. Science, 2009, 325(5944): 1124-1128.

[20] Drexler M, Parker M L, Geiger S P, Arnold W S, Hallock P. Biological assessment of eastern oysters (*Crassostrea virginica*) inhabiting reef, mangrove, seawall, and restoration substrates. Estuaries and Coasts, 2014, 37(4): 962-972.

[21] Scyphers S B, Powers S P, Heck K L Jr, Byron D. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries. PLoS One, 2011, 6(8): e22396.

[22] Quan W M, Humphries A T, Shi L Y, Chen Y Q. Determination of trophic transfer at a created intertidal oyster (*Crassostrea ariakensis*) reef in the Yangtze River estuary using stable isotope analyses. Estuaries and Coasts, 2011, 35(1): 109-120.

[23] Brown L A, Furlong J N, Brown K M, La Peyre M K. Oyster reef restoration in the northern Gulf of Mexico: Effect of artificial substrate and age on nekton and benthic macroinvertebrate assemblage use. Restoration Ecology, 2014, 22(2): 214-222.

[24] Dillon K S, Peterson M S, May C A. Functional equivalence of constructed and natural intertidal eastern oyster reef habitats in a northern Gulf of Mexico estuary. Marine Ecology Progress Series, 2015, 528: 187-203.

[25] Powers S P, Peterson C H, Grabowski J H, Lenihan H S. Success of constructed oyster reefs in no-harvest sanctuaries: implications for restoration. Marine Ecology Progress Series, 2009, 389: 159-170.

[26] Harwell H D, Kingsley-Smith P R, Lisa Kellogg M, Allen S M, Allen S K Jr, Meritt D W, Paynter K T Jr, Luckenbach M W. A comparison of *Crassostrea virginica* and *C. ariakensis* in Chesapeake Bay: does oyster species affect habitat function?. Journal of Shellfish Research, 2010, 29(2): 253-269.

[27] La Peyre M, Furlong J, Brown L A, Piazza B P, Brown K. Oyster reef restoration in the northern Gulf of Mexico: Extent, methods and outcomes. Ocean & Coastal Management, 2014, 89(2): 20-28.